

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-148466

(43)Date of publication of application : 22.05.2002

(51)Int.Ci.

G02B 6/16
G03B 37/027
G02B 6/00

(21)Application number : 2001-258560

(22)Date of filing : 28.08.2001

(71)Applicant : SUMITOMO ELECTRIC IND LTD

(72)Inventor : NAGAYAMA KATSUYA
SAITO TATSUHIKO
TSUCHIYA ICHIRO
OGA YUICHI
ISHIKAWA SHINJI
UCHIYAMA TAKENORI

(30)Priority

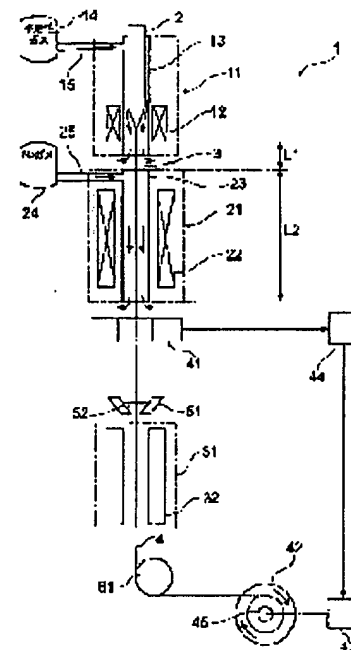
Priority number : 2000257860 Priority date : 28.08.2000 Priority country : JP
2000257850 28.08.2000 JP

(54) OPTICAL FIBER AND ITS MANUFACTURING METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical fiber capable of surely reducing a transmission loss caused by a Rayleigh scattering loss or the like and its manufacturing method.

SOLUTION: An optical fiber preform 2 in which the ratio of viscosity $R\eta = \eta_0/\eta_t$ of the core average viscosity η_0 to the whole average viscosity η_t becomes 2.5 or less is manufactured and is drawn in a line drawing furnace 11 to form the optical fiber 3. Thereafter, the optical fiber 3 is heated at a temperature within a prescribed range in a heating furnace 21 provided in the post stage and the optical fiber 3 is gradually cooled. At this time, a virtual temperature T_f within the optical fiber is lowered and the Rayleigh scattering loss is reduced. Simultaneously, the concentration of stress on the core is controlled by the condition $R\eta \leq 2.5$ of the ratio of viscosity and the occurrence of a structural irregular loss or the like is reduced. Thus, the optical fiber and its manufacturing method by which the transmission loss as a whole is surely reduced are obtained.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-148466

(P2002-148466A)

(43) 公開日 平成14年5月22日 (2002.5.22)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームコード* (参考)
G 0 2 B 6/16		G 0 2 B 6/16	2 H 0 5 0
C 0 3 B 37/027		C 0 3 B 37/027	A 4 G 0 2 1
G 0 2 B 6/00	3 5 6	G 0 2 B 6/00	3 5 6 A

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2001-258560 (P2001-258560)
(22) 出願日 平成13年8月28日 (2001.8.28)
(31) 優先権主張番号 特願2000-257860 (P2000-257860)
(32) 優先日 平成12年8月28日 (2000.8.28)
(33) 優先権主張国 日本 (J P)
(31) 優先権主張番号 特願2000-257850 (P2000-257850)
(32) 優先日 平成12年8月28日 (2000.8.28)
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(72) 発明者 永山 勝也
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内
(72) 発明者 齋藤 達彦
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内
(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

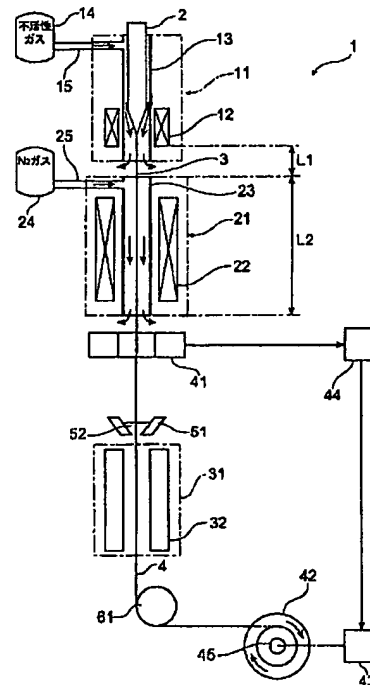
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ及びその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 レイリー散乱損失などによる伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバ、及びその製造方法を提供する。

【解決手段】 コア平均粘性 η_0 と全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ が2.5以下となる光ファイバ母材2を作製し、線引炉11で線引して光ファイバ3とした後、その後段に設けられた加熱炉21において、光ファイバ3を所定の範囲内の温度に加熱して光ファイバ3を徐冷する。このとき、加熱炉21での徐冷によって光ファイバ内の仮想温度 T_f が低下して、レイリー散乱損失が低減される。同時に、粘性比の条件 $R\eta \leq 2.5$ によってコアへの応力集中が抑制されて、構造不整損失などの発生が低減される。以上より、全体としての伝送損失を確実に低減可能な光ファイバ及びその製造方法が得られる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 コア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、

前記コア領域内の断面でのコア平均粘性 η_0 と、前記コア領域及び前記クラッド領域を合わせた全体の断面での全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ が2.5以下であるとともに、レイリー散乱損失が所定の基準値の95%以下であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項2】 前記粘性比 $R\eta$ が、光軸方向の残留応力の張力成分を σ_z 、線引時の張力を f 、前記クラッド領域の外周の半径を r_1 としたときに、関係式 $R\eta = \sigma_z / (f / \pi r_1^2)$

によって求められることを特徴とする請求項1記載の光ファイバ。

【請求項3】 前記レイリー散乱損失の指標としてレイリー散乱係数 A ($\text{dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$)を用い、純 SiO_2 に対する比屈折率差を%で表した前記コア領域への G_e の添加量を $[G_e]$ としたときの

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [G_e]$$

を基準値として、前記レイリー散乱係数 A が前記基準値 A_0 の95%以下であることを特徴とする請求項1記載の光ファイバ。

【請求項4】 波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ (dB/km)が、純 SiO_2 に対する比屈折率差を%で表した前記コア領域への G_e の添加量を $[G_e]$ としたときの

$$\alpha_0 = 0.86 + 0.29 [G_e]$$

を基準値として、前記基準値 α_0 の95%以下であることを特徴とする請求項1記載の光ファイバ。

【請求項5】 光軸方向の残留応力の張力成分が 20 MPa 以下であるか、または、前記張力成分に熱膨張成分を合わせた前記残留応力が 30 MPa 以下であることを特徴とする請求項1記載の光ファイバ。

【請求項6】 純 SiO_2 または塩素が添加された SiO_2 からなるコア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、前記クラッド領域は、各部における比屈折率差を純 SiO_2 での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件

$$\Delta n_c \geq -0.26\%$$

を満たすように、フッ素が添加されているとともに、レイリー散乱係数 A が $0.81 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 以下、または、波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が 0.82 dB/km 以下であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項7】 前記クラッド領域は、前記コア領域の外周に設けられた内クラッド層と、前記内クラッド層の外周に設けられた外クラッド層との2層のクラッド層からなるとともに、前記外クラッド層での平均比屈折率差 Δn_2 が、前記内クラッド層での平均比屈折率差 Δn_1 よりも大きく、条件

$$\Delta n_2 \geq -0.26\%$$

を満たすことを特徴とする請求項6記載の光ファイバ。

【請求項8】 前記外クラッド層は、純 SiO_2 からなるとともに、前記外クラッド層の内周の半径 r_1 と、前記外クラッド層の外周の半径 r_2 とが、条件

$$r_2 - r_1 \leq r_2 \times 0.3$$

を満たすことを特徴とする請求項7記載の光ファイバ。

【請求項9】 前記コア領域は、その平均比屈折率差 Δn_0 が、条件

$$0.01\% \leq \Delta n_0 \leq 0.12\%$$

を満たすように、塩素が添加されていることを特徴とする請求項6記載の光ファイバ。

【請求項10】 コア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、前記コア領域内の断面でのコア平均粘性 η_0 と、前記コア領域及び前記クラッド領域を合わせた全体の断面での全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ が2.5以下となる光ファイバ母材を作製し、前記光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉で線引された光ファイバを、前記線引炉の後段に設けられた加熱炉によって所定の温度範囲内の温度であるように加熱することを特徴とする光ファイバの製造方法。

【請求項11】 純 SiO_2 または塩素が添加された SiO_2 からなるコア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、前記クラッド領域は、各部における比屈折率差を純 SiO_2 での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件

$$\Delta n_c \geq -0.26\%$$

を満たすように、フッ素が添加されている光ファイバ母材を作製するとともに、前記光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉で線引された光ファイバを、前記線引炉の後段に設けられた加熱炉によって所定の温度範囲内の温度であるように加熱して、レイリー散乱係数 A が $0.81 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 以下、または、波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が 0.82 dB/km 以下である光ファイバを得ることを特徴とする光ファイバの製造方法。

【請求項12】 前記加熱炉は、前記線引された光ファイバを、前記光ファイバの温度が $1100 \sim 1700^\circ\text{C}$ の範囲内の温度であるように加熱することを特徴とする請求項10または11記載の光ファイバの製造方法。

【請求項13】 純 SiO_2 または塩素が添加された SiO_2 からなるコア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、前記クラッド領域は、各部における比屈折率差を純 SiO_2 での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件

$$\Delta n_c \geq -0.26\%$$

を満たすように、フッ素が添加されている光ファイバ母

材を作製するとともに、前記光ファイバ母材を加熱線引するときに、 $0.05 \sim 0.20 \text{ N}$ の範囲内の張力で前記光ファイバ母材の線引を行って、レイリー散乱係数 A が $0.81 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 以下、または、波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が 0.82 dB/km 以下である光ファイバを得ることを特徴とする光ファイバの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光を伝送する光ファイバ、及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光ファイバを用いた光の伝送において、光ファイバ内でのレイリー散乱によって生じる伝送損失（レイリー散乱損失）が問題となる。これに対して、レイリー散乱損失を低減することが可能な光ファイバ、あるいはその製造方法が提案されている。

【0003】例えば、文献「坂口、電子情報通信学会論文誌 2000/1 Vol. J83-C No. 1, pp. 30-36」に、線引後の光ファイバの徐冷によって、光ファイバでのレイリー散乱損失を低減することが記載されている。すなわち、ガラス内でのレイリー散乱強度は材料によって一定に定まるのではなく、ガラス内での原子の配列状態の乱雑さを示す仮想的な温度である仮想温度 T_f (Fictive Temperature) に依存する。具体的には、ガラス内の仮想温度 T_f が高く（乱雑さが大きく）になると、レイリー散乱強度は増大する。

【0004】これに対して、光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉の後段に加熱炉を設置しておき、線引後の光ファイバが加熱炉を通過するときに所定の温度範囲内となるように加熱する。これによって、加熱炉を用いた加熱で線引後の光ファイバの急激な冷却が防止され、光ファイバが徐冷される。このとき、原子の再配列によるガラスの構造緩和によって、光ファイバ内の仮想温度 T_f が低下して、光ファイバ内でのレイリー散乱強度が抑制される。

【0005】また、文献「K. Tajima, NTT REVIEW Vol. 10 No. 6, pp. 109-113 (1998)」には、低温での線引によって同様にレイリー散乱強度が抑制されることが記載されている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記した加熱炉を用いた徐冷過程を有する製造方法など、これまでに提案されているレイリー散乱損失の低減効果が得られる製造方法等では、光ファイバの伝送損失の低減は、十分に実現されているとは言えない。特に、同じ製造方法によって作製した光ファイバであっても、伝送損失の低減効果が得られる場合と、伝送損失がほとんど低減されないか、または逆に増大してしまう場合とがあるなど、伝送損失の低減効果を確実に得ることができな

い、という問題があった。

【0007】本願発明者は、上記した伝送損失の低減の不確実性の原因等について鋭意検討を重ねた結果、レイリー散乱損失を低減可能な同一の製造方法を用いた場合であっても、その製造方法を適用する光ファイバまたは光ファイバ母材の構成によって、得られる伝送損失の低減効果が大きく異なってくるを見出した。

【0008】本発明は、以上の問題点に鑑みてなされたものであり、レイリー散乱損失などによる伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバ、及びその製造方法を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明による第1の光ファイバは、コア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、コア領域内の断面でのコア平均粘性 η_0 と、コア領域及びクラッド領域を合わせた全体の断面での全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ が 2.5 以下であるとともに、レイリー散乱損失が所定の基準値の 95% 以下であることを特徴とする。

【0010】上記した光ファイバにおいては、徐冷を用いた製造方法などのレイリー散乱損失の低減効果を有する製造方法を用いるか、あるいは、レイリー散乱損失が低減されるような光ファイバの材料を選択するなどにより、レイリー散乱損失が通常の光ファイバでのレイリー散乱損失を示す基準値よりも 5% 以上低減されて、95% 以下の値となっている。さらに、そのコアと全体との粘性比 $R\eta$ が 2.5 以下 ($R\eta \leq 2.5$) となるように、光ファイバのコア領域及びクラッド領域を構成している。

【0011】粘性比 $R\eta$ に、このような条件を付することによって、レイリー散乱損失とともに、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分をも同時に低減することが可能となる。したがって、このような構成の光ファイバとすることによって、全体としての伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバが実現される。

【0012】また、粘性比 $R\eta$ が、光軸方向の残留応力の張力成分を σ_z 、線引時の張力を f 、クラッド領域の外周の半径を r_1 としたときに、関係式

$$R\eta = \sigma_z / (f / \pi r_1^2)$$

によって求められることを特徴とする。

【0013】これにより、粘性比 $R\eta$ を好適に評価して、上記した伝送損失の低減効果をより確実に得ることができる。なお、コア平均粘性 η_0 及び全体平均粘性 η_t を求めるための、光ファイバ内の各位置における粘性係数 η については、軟化時の粘性係数を用いることが好ましく、具体的には、 $1300^\circ\text{C} \sim 1900^\circ\text{C}$ の範囲内の温度、例えば、 1900°C での粘性係数を用いることができる。

【0014】また、レイリー散乱損失の指標としてレイリー散乱係数 A ($\text{dB}/\text{km} \cdot \mu\text{m}^4$)を用い、純 SiO_2 に対する比屈折率差を%で表したコア領域への G_e の添加量を $[G_e]$ としたときの

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [G_e]$$

を基準値として、レイリー散乱係数 A が基準値 A_0 の95%以下であることを特徴とする。

【0015】あるいは、波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ (dB/km)が、純 SiO_2 に対する比屈折率差を%で表したコア領域への G_e の添加量を $[G_e]$ としたときの

$$\alpha_0 = 0.86 + 0.29 [G_e]$$

を基準値として、基準値 α_0 の95%以下であることを特徴としても良い。

【0016】レイリー散乱損失についての上記した5%以上の低減の指標及び基準値として、レイリー散乱係数 A または波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を用いることによって、確実にレイリー散乱損失または全体の伝送損失の低減効果を得ることができる。また、上記した基準値の表式によれば、純 SiO_2 コアに加えて G_e 添加 SiO_2 コアについてもレイリー散乱損失の基準値が好適に得られる。

【0017】また、光軸方向の残留応力の張力成分が 20MPa 以下であるか、または、張力成分に熱膨張成分を合わせた残留応力が 30MPa 以下であることを特徴とする。

【0018】上記した光ファイバにおいては、粘性比 $R\eta$ について 2.5 以下との条件を付しているが、この粘性比 $R\eta$ は、上述した式 $R\eta = \sigma_z / (f / \pi r_1^2)$ にも示されているように、線引時に光ファイバのコア領域に加わる張力、あるいは線引後の残留応力の張力成分と密接に関係している。したがって、残留応力の張力成分、または残留応力の全体に上記した条件を付することによって、粘性比 $R\eta \leq 2.5$ の条件を満たす光ファイバとすることができる。

【0019】上記した光ファイバは、様々な製造方法によって作製することが可能である。その具体的な製造方法の1つとして、本発明による第1の光ファイバの製造方法は、コア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、コア領域内の断面でのコア平均粘性 η_0 と、コア領域及びクラッド領域を合わせた全体の断面での全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ が 2.5 以下となる光ファイバ母材を作製し、光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉で線引された光ファイバを、線引炉の後段に設けられた加熱炉によって所定の温度範囲内の温度であるように加熱することを特徴とする。

【0020】このように、その光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉の後段に設けた加熱炉を用いて光ファイバの徐冷を行うことによって、上述したように光

ファイバ内の仮想温度 T_f を低くして、レイリー散乱損失を低減することができる。また、粘性比 $R\eta$ についての上記した条件を満たす光ファイバ母材を用いることによって、線引時または徐冷時に光ファイバに発生する構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分をも同時に低減して、全体としての伝送損失の低減効果が確実に得られる製造方法とすることができる。

【0021】なお、上記した光ファイバの製造方法において、線引炉の後段に設けられる加熱炉については、線引された光ファイバを樹脂によって被覆する樹脂被覆部がある場合には、線引炉及び樹脂被覆部の間に設けられていることが好ましい。

【0022】また、加熱炉は、線引された光ファイバを、光ファイバの温度が $1100 \sim 1700^\circ\text{C}$ の範囲内の温度であるように加熱することが好ましい。

【0023】このような温度範囲とすることによって、線引後の光ファイバの徐冷による仮想温度 T_f の低減を好適に実現することができる。また、これらの温度範囲などの条件については、線引速度などに応じて、適宜好適な条件を設定することが好ましい。

【0024】また、加熱炉を用いた徐冷による製造方法以外にも、レイリー散乱損失の低減効果を有する他の製造方法においても、粘性比 $R\eta \leq 2.5$ の光ファイバまたは光ファイバ母材とすることによって、同様に、全体としての伝送損失の低減効果を確実に得ることができる。

【0025】また、本発明による第2の光ファイバは、純 SiO_2 または塩素が添加された SiO_2 からなるコア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、クラッド領域は、各部における比屈折率差を純 SiO_2 での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件

$$[\Delta n_c] \geq -0.26\%$$

を満たすように、フッ素が添加されているとともに、レイリー散乱係数 A が $0.81 \text{dB}/\text{km} \cdot \mu\text{m}^4$ 以下、または、波長 $1.00 \mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が $0.82 \text{dB}/\text{km}$ 以下であることを特徴とする。

【0027】純 SiO_2 (純石英)のコア、またはそれに準じるコアを有する光ファイバ (光ファイバ母材)では、コア領域の粘性が、 F などが添加されているクラッド領域よりも大きくなる。このため、光ファイバ母材の線引時の張力によって、光ファイバ内に発生する応力がコアに集中する。このとき、得られる光ファイバでの伝送損失の張力依存性が大きくなり、伝送損失が増大する原因となる。

【0028】上記した光ファイバにおいては、コア領域を、純 SiO_2 とするとともに、クラッド領域を、 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たす範囲の添加量で、クラッド領域の全体または一部に F (フッ素)を添加して構成している。そして、このような光ファイバの構成を適用するこ

とにより、レイリー散乱係数 A または伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、及び伝送損失 $\alpha_{1.55}$ に対して、通常の光ファイバでの基準値よりも低減された上記の数値範囲を実現している。

【0029】このようなコア領域及びクラッド領域の構成によれば、クラッド領域に対して F の添加量の上限値を与えることによって、クラッド領域に応力が分散されるので、純 SiO_2 コアを有する光ファイバにおけるコアへの応力集中を抑制して、得られる光ファイバでの伝送損失の張力依存性を低減することができる。これにより、レイリー散乱損失とともに、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分をも同時に低減することが可能となる。したがって、このような構成の光ファイバとすることによって、全体としての伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバが実現される。

【0030】なお、レイリー散乱係数 A 及び伝送損失 $\alpha_{1.00}$ の基準値については、通常の構成及び通常の製造方法で得られる純 SiO_2 コア（または純 SiO_2 コアに準じる Cl 添加 SiO_2 コア）の光ファイバでは、それぞれおよそ $0.85\text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 、及び 0.86 dB/km の値である。これに対して、本発明による構成を有する光ファイバによれば、レイリー散乱係数 A または伝送損失 $\alpha_{1.00}$ について、それぞれ約5%以上低減された上記の数値範囲が得られる。

【0031】また、クラッド領域は、コア領域の外周に設けられた内クラッド層と、内クラッド層の外周に設けられた外クラッド層との2層のクラッド層からなるとともに、外クラッド層での平均比屈折率差 Δn_2 が、内クラッド層での平均比屈折率差 Δn_1 よりも大きく、条件 $\Delta n_2 \geq -0.26\%$ を満たすことを特徴とする。

【0032】上記した光ファイバは、伝送される光をコア領域及びその近傍へと効率的に閉じ込めるための、 F の添加量が多い（比屈折率差が小さい）内クラッド層と、伝送特性を調整する効果やコアへの応力集中を低減する効果などを有する、 F の添加量が小さい（比屈折率差が多い）外クラッド層との2層構造からなるクラッド領域を備える。このような構成からなる光ファイバにおいても、上記したコア領域及びクラッド領域の構成を適用することによって、1層構造のクラッド領域を備える光ファイバなどと同様に、コアへの応力集中の抑制によって伝送損失を低減することが可能である。

【0033】また、外クラッド層は、純 SiO_2 からなるとともに、外クラッド層の内周の半径 r_1 と、外クラッド層の外周の半径 r_2 とが、条件 $r_2 - r_1 \leq r_2 \times 0.3$

を満たすことを特徴とする。

【0034】2層構造のクラッド領域を備える光ファイバにおいて、このように内クラッド層よりも平均比屈折率差が大きい外クラッド層を、純 SiO_2 とした場合（ $\Delta n_2 = 0$ ）においても、上記のように外クラッド層

の厚みを光ファイバ全体の30%以下とすることによって、充分なコアへの応力集中の抑制効果を得るとともに、この外クラッド層の伝送特性への影響を好適な範囲内とすることができる。

【0035】また、コア領域は、その平均比屈折率差 Δn_0 が、条件

$$0.01\% \leq \Delta n_0 \leq 0.12\%$$

を満たすように、塩素が添加されていることを特徴としても良い。

【0036】ここで、屈折率を上げる添加物である Cl （塩素）は、伝送損失などへの影響が少なく、純 SiO_2 コアの光ファイバと同様に扱える。また、 Cl の添加によって、コアの粘性も小さくされる。なお、このとき、コア領域は、領域内でグレーデッド型の屈折率分布を有するように構成されていても良い。

【0037】また、本発明による第2の光ファイバの製造方法は、純 SiO_2 または塩素が添加された SiO_2 からなるコア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、クラッド領域は、各部における比屈折率差を純 SiO_2 での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$

を満たすように、フッ素が添加されている光ファイバ母材を作製するとともに、光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉で線引された光ファイバを、線引炉の後段に設けられた加熱炉によって所定の温度範囲内の温度であるように加熱して、レイリー散乱係数 A が $0.81\text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 以下、または、波長 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が 0.82 dB/km 以下である光ファイバを得ることを特徴とする。

【0038】このように、その光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉の後段に設けた加熱炉を用いて光ファイバの徐冷を行うことによって、上述したように光ファイバ内の仮想温度 T_f を低くして、レイリー散乱損失を低減することができる。また、コア領域及びクラッド領域が上記した構成を有する光ファイバ母材を用いることによって、線引時または徐冷時に光ファイバに発生する構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分をも同時に低減して、全体としての伝送損失の低減効果が確実に得られる製造方法とすることができる。

【0039】なお、上記した光ファイバの製造方法において、線引炉の後段に設けられる加熱炉については、線引された光ファイバを樹脂によって被覆する樹脂被覆部を使用する場合には、線引炉及び樹脂被覆部の間に設けられていることが好ましい。

【0040】また、加熱炉は、線引された光ファイバを、光ファイバの温度が $1100 \sim 1700^\circ\text{C}$ の範囲内の温度であるように加熱することが好ましい。

【0041】このような温度範囲とすることによって、線引後の光ファイバの徐冷による仮想温度 T_f の低減を

好適に実現することができる。また、これらの温度範囲などの条件については、線引速度などに応じて、適宜好適な条件を設定することが好ましい。

【0042】また、加熱炉を用いた徐冷による製造方法以外にも、レイリー散乱損失の低減効果を有する他の製造方法においても、上記した構成の光ファイバまたは光ファイバ母材とすることによって、同様に、全体としての伝送損失の低減効果を確実に得ることができる。

【0043】あるいは、本発明による光ファイバの製造方法は、純SiO₂または塩素が添加されたSiO₂からなるコア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域と、を備え、クラッド領域は、各部における比屈折率差を純SiO₂での屈折率を基準として%で表して定義したときに、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$

を満たすように、フッ素が添加されている光ファイバ母材を作製するとともに、光ファイバ母材を加熱線引するときに、0.05~0.20Nの範囲内の張力で光ファイバ母材の線引を行って、レイリー散乱係数Aが0.81dB/km・ μm^4 以下、または、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が0.82dB/km以下である光ファイバを得ることを特徴とする。

【0044】コアへの応力集中が抑制される光ファイバ母材（光ファイバ）の構成とするとともに、線引時の張力が0.05~0.20Nの好適な張力値範囲内に保持されるように張力制御を行うことによって、伝送損失が低減された光ファイバを確実に得ることができる。

【0045】

【発明の実施の形態】以下、図面とともに本発明による光ファイバ及びその製造方法の好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0046】まず、本発明による第1の光ファイバ、及び光ファイバの製造方法について説明する。

【0047】図1に示す線引装置1は、石英ガラス系光ファイバを線引するための線引装置であって、線引炉11、徐冷用の加熱炉21及び樹脂硬化部31を有して構成されている。これらの線引炉11、加熱炉21及び樹脂硬化部31は、光ファイバ母材2を線引する方向（図1における上下方向）に、線引炉11、加熱炉21、樹脂硬化部31の順で設置されている。

【0048】まず、母材供給装置（図示していない）に保持された光ファイバ母材2を線引炉11に供給し、線引炉11内のヒータ12で光ファイバ母材2の下端を加熱して軟化させ、光ファイバ3を線引する。線引炉11の炉心管13には、不活性ガス供給部14からの不活性ガス供給通路15が接続されており、線引炉11の炉心管13内が不活性ガス雰囲気となるように構成されてい

る。

【0049】ここで、母材供給装置から供給される光ファイバ母材2については、コア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域とからなる光ファイバ母材2内での各部の粘性について、所定の条件を満たすように光ファイバ母材2を作製して用いる。すなわち、コア領域内の断面でのコア平均粘性 η_0 と、コア領域及びクラッド領域を合わせた全体の断面での全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ について、粘性比 $R\eta$ が2.5以下（ $R\eta \leq 2.5$ ）となるように光ファイバ母材2を作製している。

【0050】加熱線引された光ファイバ3は炉心管13内にて、1700℃程度にまで不活性ガスにより急激に冷却される。その後、光ファイバ3は、炉心管13の下部から線引炉11外に出され、線引炉11と加熱炉21との間にて空冷される。不活性ガスとしては、例えばN₂ガスを用いることができ、このN₂ガスの熱伝導係数 λ （T=300K）は26mW/（m・K）である。空気の熱伝導係数 λ （T=300K）は26mW/（m・K）である。

【0051】次に、空冷された光ファイバ3を、線引炉11の後段であって、線引炉11と樹脂硬化部31との間に設けられた徐冷用の加熱炉21に送る。そして、光ファイバ3の所定区間を所定の温度範囲内の温度であるように加熱して、所定の冷却速度にて徐冷する。この加熱炉21は、その中を光ファイバ3が通る炉心管23を有する。この炉心管23は、光ファイバ母材2の線引方向（図1における上下方向）での全長L2（m）が、 $L2 \geq V/8$

を満足するように設定するのが好ましい。ここで、Vは線引速度（m/s）である。

【0052】また、加熱炉21は、炉心管23の位置が、炉心管23に入る直前の光ファイバ3の温度（入線温度）が1400~1800℃の範囲となる位置に設定されており、線引炉11に対して、 $L1 \leq 0.2 \times V$

を満足するように設けられるのが好ましい。ここで、L1は線引炉11のヒータ12の下端から炉心管23の上端までの距離（m）、Vは線引速度（m/s）である。また、加熱炉21のヒータ22の温度は、炉中心（光ファイバ3が通る部分）の温度が1100~1600℃、好ましくは1200~1600℃の範囲内の温度、特に、1250~1500℃、さらに好ましくは1300~1500℃の範囲内の温度となるように設定されている。

【0053】上述した加熱炉21（炉心管23）の位置及び長さの設定により、徐冷用の加熱炉21において、加熱線引された光ファイバ3が、その温度が1100~1700℃、好ましくは1200~1700℃の範囲内の温度であるように加熱される。特に、光ファイバ3の

温度が $1100\sim 1700^{\circ}\text{C}$ となる部分のうち、光ファイバ3の温度差が 50°C 以上となる区間、例えば、光ファイバ3の温度が $1250\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 、好ましくは $1300\sim 1500^{\circ}\text{C}$ となる部分（温度差が 200°C となる区間）が $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以下の冷却速度で徐冷されることになる。

【0054】なお、炉中心の温度を $1100\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 、好ましくは $1200\sim 1600^{\circ}\text{C}$ の範囲内の温度に設定することにより、加熱線引された光ファイバ3において温度が $1100\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 、好ましくは $1200\sim 1700^{\circ}\text{C}$ となる部分のうち、光ファイバ3の温度差が 50°C 以上となる区間が $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以下の冷却速度で徐冷されることになる。

【0055】加熱炉21の炉心管23には、 N_2 ガス供給部24からの N_2 ガス供給通路25が接続されており、加熱炉21の炉心管23内が N_2 ガス雰囲気となるように構成されている。 N_2 ガスを用いる代わりに、空気あるいは Ar などの分子量の比較的大きいガス等を用いることも可能である。ただし、カーボンヒータを用いる場合には、不活性ガスを用いる必要がある。

【0056】加熱炉21を出た光ファイバ3は、外径測定手段としての外径測定器41により外径がオンライン測定され、その測定値がドラム42を回転駆動する駆動モータ43にフィードバックされて外径が一定となるように制御される。外径測定器41からの出力信号は、制御手段としての制御ユニット44に送られ、光ファイバ3の外径が予め設定された所定値となるように、ドラム42（駆動モータ43）の回転速度を演算により求める。

【0057】制御ユニット44からは、演算により求めたドラム42（駆動モータ43）の回転速度を示す出力信号が駆動モータ用ドライバ（図示していない）に出力され、この駆動モータ用ドライバは制御ユニット44からの出力信号に基づいて、駆動モータ43の回転速度を制御する。

【0058】その後、光ファイバ3に、コーティングダイス51によりUV樹脂52が塗布される。塗布されたUV樹脂52は、樹脂硬化部31のUVランプ32により硬化されて、光ファイバ素線4が形成される。そして、光ファイバ素線4は、ガイドローラ61を経て、ドラム42により巻き取られる。ドラム42は、回転駆動軸45に支持されており、この回転駆動軸45の端部は駆動モータ43に接続されている。

【0059】ここで、本実施形態においては、コーティングダイス51及び樹脂硬化部31によって、光ファイバを樹脂によって被覆する樹脂被覆部が構成されている。この樹脂被覆部としては、上記した構成に限らず、熱硬化樹脂を塗布し、加熱炉により硬化させるように構成してもよい。

【0060】なお、線引炉11の炉心管13には、上記

したように不活性ガス供給部14からの不活性ガス供給通路15が接続されており、線引炉11の炉心管13内が不活性ガス雰囲気となるように構成されているが、不活性ガス供給部14として N_2 ガス供給部を設け、炉心管13内に N_2 ガスを供給して N_2 ガス雰囲気となるように構成してもよい。

【0061】線引速度が低速、例えば $100\text{m}/\text{min}$ の場合には、光ファイバ3が He ガス雰囲気では線引炉11（炉心管13）内で 1000°C 程度まで冷却されてしまうことがあるため、この場合、炉心管13内を N_2 ガス雰囲気として、線引炉11（炉心管13）出口での光ファイバ3の温度を 1700°C 程度とすることが好ましい。また、 He ガス供給部と N_2 ガス供給部とを設け、線引速度に対応して、炉心管13内に He ガスまたは N_2 ガスを供給するように構成してもよい。実際には、一旦冷却後の再加熱により $1100\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 、好ましくは $1200\sim 1700^{\circ}\text{C}$ としても、構造緩和は可能である。ただし、この場合には、再加熱するのにヒータ長のロスが出ることとなる。

【0062】上記した光ファイバの製造方法は、加熱炉21を用いた徐冷による光ファイバ内の仮想温度 T_f の低下によって、光ファイバにおける光の伝送損失の要因となるレイリー散乱損失を低減可能な製造方法である。さらに、本実施形態においては、この製造方法を適用する光ファイバ母材（あるいはその光ファイバ母材から得られる光ファイバ）の構成について、上記したように、コア平均粘性 η_0 と全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0/\eta_t$ を2.5以下（ $R\eta \leq 2.5$ ）としている。

【0063】このような粘性比の条件を満たす構成の光ファイバ及び光ファイバ母材に対して、図1に示した徐冷過程を有する製造方法などの、レイリー散乱損失を低減可能な製造方法を適用することによって、レイリー散乱損失などによる伝送損失を全体として確実に低減することが可能となる。

【0064】すなわち、光ファイバ内を伝送される光に対するレイリー散乱損失が、通常の光ファイバでのレイリー散乱損失を示す所定の基準値の95%以下となるように十分に低減（5%以上低減）されるとともに、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分についても、その発生及び増大が同時に抑制されて、全体として非常に低伝送損失な光ファイバを得ることができる。

【0065】以下、コア平均粘性 η_0 、全体平均粘性 η_t 、粘性比 $R\eta = \eta_0/\eta_t$ 、及び上記した粘性比の条件 $R\eta \leq 2.5$ を適用することによる伝送損失の低減効果について、具体的に説明する。

【0066】まず、コア平均粘性 η_0 、全体平均粘性 η_t 、及び粘性比 $R\eta$ の定義等について説明する。ここで、図2に示すように、コア領域100と、その外周に設けられたクラッド領域101との2層から構成された

光ファイバ（または光ファイバ母材）を考える。また、コア領域100の外周の半径を r_0 、クラッド領域101の外周の半径を r_1 とするとともに、断面の各位置における粘性を表す粘性係数を η で表すこととする。

【0067】このとき、コア領域100内の断面について、粘性係数 η を平均したコア平均粘性 η_0 は、次式
$$\eta_0 = \int_0 \eta dS / \int_0 dS$$
$$= \int_0 \eta dS / \pi r_0^2$$

で求められる。ここで、 $\int_0 \eta dS$ は、断面内の各位置に対する粘性係数 η の、図2に示したコア領域100の断面の範囲での積分を示す。また、 $\int_0 dS$ は、式中に示したように、コア領域100の断面面積 πr_0^2 に相当している。

【0068】同様に、コア領域100及びクラッド領域101を合わせた全体の断面について、粘性係数 η を平均した全体平均粘性 η_t は、次式

$$\eta_t = \int_t \eta dS / \int_t dS$$

$$= \int_t \eta dS / \pi r_1^2$$

で求められる。ここで、 $\int_t \eta dS$ は、断面内の各位置に対する粘性係数 η の、図2に示したコア領域100及びクラッド領域101の断面全体の範囲での積分を示す。また、 $\int_t dS$ は、式中に示したように、コア領域100及びクラッド領域101を合わせた断面面積 πr_1^2 に相当している。

【0069】以上のように求められたコア平均粘性 η_0 及び全体平均粘性 η_t から、粘性比 $R\eta$ が $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ として求められる。

【0070】なお、クラッド領域が、異なる屈折率を有する複数のクラッド層から構成されている場合には、それらの複数のクラッド層の全体をクラッド領域として、上記の式（例えば粘性係数 η の積分式）を適用すれば良い。また、光ファイバ内の各位置での粘性係数 η については、軟化時の粘性係数を用いることが好ましく、具体的には、1300℃～1900℃の範囲内の温度、例えば、1900℃での粘性係数を用いることができる。

【0071】次に、粘性比についての条件 $R\eta \leq 2.5$ を適用することによる伝送損失の低減効果について説明する。

【0072】コア領域100及びクラッド領域101の粘性については、純SiO₂（シリカ）コアを有する構成の光ファイバなどにおいては、クラッド領域101に比べてコア領域100の粘性 η_0 が大きくなる。このように、粘性 η_0 が大きく粘性比 $R\eta$ の値が大きいと、線引時または線引後などに光ファイバに加わる張力や応力がコア領域100に集中する。

【0073】すなわち、光ファイバ内の各位置における粘性係数 η は、Ge、ClやFなどの屈折率を変化させる添加物を、SiO₂ガラス（石英ガラス）に添加することによって、その粘性が小さくなるように変化する。具体的には、粘性係数 η は次式

$$\log_{10} \eta = 5.6 + 1.58 [F] - 0.57 [Ge, Cl]$$

にしたがって変化する（文献「K. Shiraki et al., Electronics Letters, Vol. 29 No. 14, pp. 1263-1264 (1993)」参照）。

【0074】ここで、[F]は、純SiO₂に対する比屈折率差（%）の値で表したF（フッ素）の添加量、

[Ge、Cl]は、同様に純SiO₂に対する比屈折率差（%）の値で表したGe（ゲルマニウム）またはCl（塩素）の添加量を表している。ただし、Clについては、その粘性係数 η に対する影響がGeと同等であると仮定している。

【0075】また、それぞれの添加物をSiO₂ガラスに添加したときの屈折率変化から、比屈折率差で表したそれぞれの添加量の符号は、[F] < 0、[Ge、Cl] > 0である。すなわち、上記の式より、Ge、ClやFなどを添加することによって、SiO₂ガラスの粘性係数 η は小さくなる。したがって、純SiO₂コアやコアへの添加物の添加量が少ない光ファイバでは、クラッド領域101の粘性がFの添加などによって小さくなるので、コア領域100での粘性 η_0 、及び粘性比 $R\eta$ が大きい値となる。

【0076】そして、このように粘性比 $R\eta$ が大きいと、図1に示した、線引後に加熱炉を用いた徐冷を行う製造方法など、レイリー散乱損失の低減効果を有する製造方法によって光ファイバを作製した場合においても、充分な伝送損失の低減効果が得られない。

【0077】これは、主に、光ファイバ内の仮想温度 T_f の低下などによってレイリー散乱損失が低減される一方で、上記したコア領域100への応力集中によって、構造不整損失などの他の伝送損失成分が増大してしまい、全体として伝送損失が充分に低減されないかまたは増大するものと考えられる。また、レイリー散乱損失の低減についても、応力集中などの原因によって充分にその効果が得られない可能性もある。

【0078】これに対して、光ファイバまたは光ファイバ母材の構成として、粘性比の条件 $R\eta \leq 2.5$ を満たすこととすることによって、得られる光ファイバでのレイリー散乱損失を、基準値から5%以上確実に低減して、基準値の95%以下の値とすることができる。同時に、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分の発生及び増大を抑制することができる。以上より、全体としての伝送損失の確実な低減が可能となる。

【0079】なお、粘性比 $R\eta$ が小さい場合については、コアへの応力集中の点からは下限値は必要とはならないが、コア内でのGeなどの添加量が大きくなりすぎると、添加物による伝送損失の増大などによって光ファイバとして不適当となることから、 $R\eta \geq 0.07$ とすることが好ましい。

【0080】レイリー散乱損失の低減効果を評価するた

めの指標としては、レイリー散乱係数Aを用いることができる。光ファイバでの波長 λ における伝送損失 $\alpha\lambda$ (dB/km)は、上記したようにレイリー散乱損失と、それ以外の構造不整損失などの伝送損失成分により、一般に次式

$$\alpha\lambda = A/\lambda^4 + B + C(\lambda)$$

で表される。このうち、第1項 A/λ^4 (dB/km)がレイリー散乱損失を示しており、その係数Aがレイリー散乱係数 (dB/km $\cdot\mu\text{m}^4$)である。上式より、レイリー散乱損失はレイリー散乱係数Aに比例しており、したがって、レイリー散乱係数Aが基準値から5%低減されれば、レイリー散乱損失が5%低減されたこととなる。

【0081】ここで、徐冷によってレイリー散乱損失を低減するなどの製造方法以外の、通常の製造方法で得られる光ファイバでは、純SiO₂に対する比屈折率差(%)の値で表したコア領域100へのGeの添加量を[Ge]とすると、レイリー散乱係数A (dB/km $\cdot\mu\text{m}^4$)の値は、次式

$$A_0 = 0.85 + 0.29[\text{Ge}]$$

となる。したがって、この通常での値 A_0 をレイリー散乱係数Aの基準値とすることができる。このとき、得られた光ファイバでのレイリー散乱係数Aが、基準値 A_0 から5%以上低減されていれば良い。

【0083】また、レイリー散乱損失を含む全体の伝送損失を評価するため、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を指標としても良い。波長1.00 μm では、上記した伝送損失 $\alpha\lambda$ の表式中、 $B + C(\lambda)$ はほぼ0.01であり、したがって、通常の製造方法で得られる光ファイバでは、伝送損失 $\alpha_{1.00}$ (dB/km)の値は、次式

$$\alpha_0 = A_0 + 0.01$$

$$= 0.86 + 0.29[\text{Ge}]$$

となる。したがって、この通常での値 α_0 を伝送損失 $\alpha_{1.00}$ の基準値とすることができる。このとき、得られた光ファイバでの伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が、基準値 α_0 から5%以上低減されることが好ましい。

【0084】このように、レイリー散乱係数A、または波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を指標として用いることによって、レイリー散乱損失、あるいは構造不整損失などを含む全体の伝送損失の低減効果を確実に得ることが可能となる。また、上記した基準値の各表式によれば、表式中にGeの添加量[Ge]が含まれている。したがって、コアへのGeの添加量に応じた伝送損失の評価が可能である。

【0085】なお、レイリー散乱係数Aについては、上式より、伝送損失の波長依存性のデータ(例えば1/ λ^4 プロットでの傾き)から求めることができる。また、全体の伝送損失を評価する指標として、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を用いているが、これは、1.0

0 μm での伝送損失の値が、光伝送に用いられる1.55 μm 帯などに比べて大きく、1~10km程度の比較的短い光ファイバサンプルで、十分な精度で評価できるためである。

【0086】ただし、本発明の光ファイバでは、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ と、波長1.55 μm での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ とは一定の関係を有して対応しており、伝送損失 $\alpha_{1.00}$ で低減効果を評価することによって、伝送損失 $\alpha_{1.55}$ についても、同様にその低減を確認することができる。具体的な対応関係としては、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ は、上記したように $\alpha_{1.00} = A + 0.01$

で表されるが、この表式に相当する波長1.55 μm での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ の表式は、次式

$$\alpha_{1.55} = A \times 0.17325 + 0.025$$

である。

【0087】上記した光ファイバ及びその製造方法においては、コア平均粘性 η_0 及び全体平均粘性 η_t による粘性比 $R\eta$ について、条件 $R\eta \leq 2.5$ を付している。この粘性比 $R\eta$ は、線引時に光ファイバのコア領域に加わる張力、または線引後の残留応力における張力成分と密接に関係している。したがって、これらの応力または張力によっても、粘性比 $R\eta$ について評価することが可能である。

【0088】線引後の光ファイバでの残留応力は、線引時の張力に起因する張力成分と、それ以外の熱膨張によって生じる熱膨張成分とからなる。ここで、光軸方向の残留応力の張力成分を σ_z とすると、張力成分 σ_z は、次式

$$\sigma_z = f \times \eta_0 / \int_t \eta dS$$

で定義される。ここで、 f は線引時の張力を示している。

【0089】一方、粘性比 $R\eta$ は、粘性について上述した各表式から、

$$R\eta = \eta_0 / (\int_t \eta dS / \int_t dS)$$

$$= \eta_0 / (\int_t \eta dS / \pi r_1^2)$$

である。なお、 r_1 は、図2に示すように、クラッド領域101の外周の半径である。粘性比 $R\eta$ はこの両式から、張力成分 σ_z を用いて、次式

$$R\eta = \sigma_z / (f / \int_t dS)$$

$$= \sigma_z / (f / \pi r_1^2)$$

で表される。

【0090】ここで、典型的な条件として張力 $f = 0.1\text{N}$ (10gw)、 $r_1 = 62.5\mu\text{m}$ (光ファイバ直径が125 μm)とすると、粘性比 $R\eta = 2.5$ は、張力成分 $\sigma_z = 20\text{MPa}$ にほぼ相当している。したがって、粘性比の条件 $R\eta \leq 2.5$ を満たすためには、光軸方向の残留応力の張力成分 σ_z を20MPa以下 ($\sigma_z \leq 20\text{MPa}$)とすることが好ましい。また、熱膨張成分をも加えた残留応力の全体からみた場合には、熱膨張

成分がほぼ10MPa程度であることから、残留応力を30MPa以下とすることが好ましい。

【0091】なお、光ファイバ内の残留応力分布の測定については、例えば、Photoelasticcomputer tomographyを用いる方法などがある（文献「T. Abe et al., J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 3 No. 1, pp. 133-138 (1986)」参照）。

【0092】本発明の第1の光ファイバ及びその製造方法による伝送損失の低減効果について、具体的な実施例及び比較例を示す。なお、以下の実施例及び比較例での光ファイバは、いずれも図1に示した加熱炉での徐冷を用いた製造方法、及び徐冷を行わない通常の製造方法によって作製して、その伝送損失の低減効果を確認した。また、徐冷用の加熱炉での加熱条件については、1350℃で通過時間3秒に設定した。

【0093】図3は、光ファイバの第1の実施例について、その屈折率プロファイルを示す図である。本実施例の光ファイバは、図2と同様に、中心軸を含むコア領域100と、その外周のクラッド領域101とから構成されている。各領域の半径 r_0 、 r_1 は、それぞれ $2r_0=10\mu\text{m}$ 、 $2r_1=125\mu\text{m}$ とした。

【0094】また、クラッド領域101を純SiO₂とするとともに、コア領域100には、純SiO₂に対する比屈折率差(%)で添加量が $[Ge]_0=+0.35\%$ となるようにGeを添加した。

【0095】図4は、光ファイバの第2の実施例について、その屈折率プロファイルを示す図である。本実施例の光ファイバは、中心軸を含むコア領域200と、その外周の2つのクラッド領域202、203とから構成されており、クラッド領域202及び203を合わせて、全体のクラッド領域201となっている。各領域の半径

r_0 、 r_2 、 r_3 ($=r_1$) は、それぞれ $2r_0=10\mu\text{m}$ 、 $2r_2=55\mu\text{m}$ 、 $2r_3(=2r_1)=125\mu\text{m}$ とした。

【0096】また、コア領域200には、純SiO₂に対する比屈折率差(%)で添加量が $[Cl]_0=+0.08\%$ となるようにClを添加した。一方、2つのクラッド領域202、203には、純SiO₂に対する比屈折率差(%)で添加量がそれぞれ $[F]_2=-0.28\%$ 、 $[F]_3=-0.20\%$ となるようにFを添加した。

【0097】さらに、光ファイバの第3の実施例として、第2の実施例と同様の構成の光ファイバについて、徐冷用の加熱炉での加熱条件を、1100℃で通過時間3秒に設定して光ファイバを作製した。

【0098】図5は、光ファイバの比較例について、その屈折率プロファイルを示す図である。本比較例の光ファイバは、中心軸を含むコア領域300と、その外周のクラッド領域301とから構成されている。各領域の半径 r_0 、 r_1 は、それぞれ $2r_0=10\mu\text{m}$ 、 $2r_1=125\mu\text{m}$ とした。

【0099】また、コア領域300には、純SiO₂に対する比屈折率差(%)で添加量が $[Cl]_0=+0.08\%$ となるようにClを添加した。一方、クラッド領域301には、比屈折率差(%)で添加量が $[F]_1=-0.35\%$ となるようにFを添加した。

【0100】以上の第1、第2、第3の実施例、及び比較例について、粘性比 $R\eta$ 、伝送損失 $\alpha_{1.55}$ (dB/km)、 $\alpha_{1.00}$ (dB/km)、及びレイリー散乱係数 A (dB/km $\cdot\mu\text{m}^4$)を求めた結果を表1に示す。

【表1】

	粘性比 $R\eta$	徐冷なし			徐冷あり		
		$\alpha_{1.55}$	A	$\alpha_{1.00}$	$\alpha_{1.55}$	A	$\alpha_{1.00}$
実施例1	0.63	0.190	0.95	0.96	0.180	0.89	0.90
実施例2	1.90	0.170	0.85	0.86	0.161	0.80~0.79	0.81~0.80
実施例3	1.90	0.170	0.85	0.86	0.164	0.81	0.82
比較例	3.20	0.170	0.85	0.86	0.170	0.80~0.79	0.82~0.81

(単位: $\alpha_{1.55}$ 、 $\alpha_{1.00}$ =dB/km; A=dB/km $\cdot\mu\text{m}^4$)

【0101】この結果では、各光ファイバでの粘性比 $R\eta$ については、実施例ではそれぞれ0.63、1.90と、 $R\eta \leq 2.5$ の条件を満たしている。これに対して、比較例では、粘性比 $R\eta$ の値は3.20となっており、2.5を超えた値の粘性比となっている。

【0102】また、第1、第2の実施例及び比較例について図6に示した残留応力のグラフをみると、実施例ではいずれも比較的小さい残留応力となっている。これに対して、粘性比 $R\eta$ が3.20と大きい比較例では、張力の増加に伴って非常に大きい残留応力が発生していることがわかる。

【0103】このような粘性比を有する光ファイバに対して、それぞれ線引後の加熱炉による徐冷なし/ありの場合での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ 、レイリー散乱係数A、及び伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を比較すると、粘性比 $R\eta \leq 2.5$ を満たす第1、第2、及び第3の実施例では、徐冷ありの場合に、レイリー散乱係数A及び伝送損失 $\alpha_{1.55}$ 、 $\alpha_{1.00}$ とともに、徐冷なしの場合に比べて充分な低減効果が得られている。

【0104】一方、粘性比 $R\eta > 2.5$ の比較例では、徐冷ありの場合に、レイリー散乱係数Aについては、実施例と同様に低減効果が得られているが、全体の伝送損

失 $\alpha 1.55$ 、 $\alpha 1.00$ としては、大きい粘性比に起因する構造不整損失の増大などにより、伝送損失の低減効果が十分に得られていないことがわかる。

【0105】以上より、徐冷を用いた製造方法などのレイリー散乱損失の低減効果を有する製造方法を用いるとともに、光ファイバまたは光ファイバ母材の粘性比に対して $R\eta \leq 2.5$ の条件を付することによって、レイリー散乱損失を確実に5%以上低減して通常の基準値の95%以下とすると同時に、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分の発生及び増大を防止し、全体としての伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバ、及びその製造方法が実現される。

【0106】続いて、本発明による第2の光ファイバ、及び光ファイバの製造方法について説明する。

【0107】ここで、以下において、各部における屈折率の値を示す比屈折率差は、純SiO₂（純石英）での屈折率を基準（比屈折率差＝0）とし、純SiO₂からの比屈折率差を%で表して定義するものとする。また、各領域、各層における平均比屈折率差については、それぞれ、その領域内（層内）で、比屈折率差を面積によって重み付けして平均した値によって定義する。

【0108】まず、光ファイバの製造方法について説明する。本発明による第2の光ファイバの製造方法は、上述した第1の製造方法とほぼ同様である。また、光ファイバの製造に用いられる線引装置としては、図1に示した構成の線引装置が用いられる。

【0109】ただし、母材供給装置から供給される光ファイバ母材2については、コア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域とからなる光ファイバ母材2の構成について、所定の条件を満たすように光ファイバ母材2を作製している。すなわち、コア領域を、純SiO₂コア、または純SiO₂に準じて扱うことが可能なC1（塩素）添加SiO₂コアとするとともに、クラッド領域を、その平均比屈折率差 Δn_c が、条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$

を満たすようにF（フッ素）が添加された構成として、光ファイバ母材2を作製している。

【0110】上記した光ファイバの製造方法は、加熱炉21を用いた徐冷による光ファイバ内の仮想温度 T_f の低下によって、光ファイバにおける光の伝送損失の要因となるレイリー散乱損失を低減可能な製造方法である。さらに、本実施形態においては、この製造方法を適用する光ファイバ母材（あるいはその光ファイバ母材から得られる光ファイバ）の構成について、上記したように、コア領域を純SiO₂またはC1添加SiO₂とするとともに、クラッド領域を、その平均比屈折率差が条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たすようにFを添加して構成している。

【0111】このような条件を満たす構成の光ファイバ及び光ファイバ母材に対して、図1に示した徐冷過程を

有する製造方法などの、レイリー散乱損失を低減可能な製造方法を適用することによって、レイリー散乱損失などによる伝送損失を全体として確実に低減することが可能となる。

【0112】すなわち、このように、レイリー散乱損失の低減効果を有する製造方法を適用した場合でも、全体の伝送損失としては、必ずしも伝送損失が低減されない。これは、レイリー散乱損失が低減される一方で、コアへの過度の応力集中によって構造不整損失などの他の伝送損失成分が増大してしまい、全体として伝送損失の低減効果が得られないためと考えられる。また、構造不整損失などの発生を抑制しようとする、逆にレイリー散乱損失の低減効果を十分に得られないこととなる。

【0113】一般的には、光ファイバ母材2を加熱線引するときに光ファイバに加えられる張力について、低張力ではレイリー散乱損失は低減されるものの、構造不整損失が増大し、逆に高張力ではSiO₂の結合への影響などによって、レイリー散乱損失が増大してしまう。

【0114】これに対して、上記の構成による光ファイバ母材及び光ファイバを適用することにより、クラッド領域へのFの添加量に対して、クラッド領域に応力が好適に分散される上限値が与えられるので、純SiO₂コアを有する光ファイバにおけるコアへの応力集中を抑制して、得られる光ファイバでの伝送損失の張力依存性を低減することができる。これにより、レイリー散乱損失とともに、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分をも同時に低減することが可能となる。したがって、このような構成の光ファイバとすることによって、全体としての伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバが実現される。

【0115】具体的には、レイリー散乱係数Aについては、通常の純SiO₂コア（または純SiO₂コアに準じるC1添加SiO₂コア）の光ファイバでの基準値0.85dB/km・ μm^4 から約5%以上低減された0.81dB/km・ μm^4 以下の数値範囲とすることができる。また、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha 1.00$ については、同様の基準値0.86dB/kmから約5%以上低減された0.82dB/km以下の数値範囲とすることができる。

【0116】また、上記した光ファイバの製造方法において、線引炉11での線引時の張力については、過度の張力変化による伝送損失の増大等を抑制するため、許容される好適な張力値範囲内となるように張力制御を行うことが好ましい。また、この好適な張力値範囲としては、張力が0.05～0.20N（5～20gw）の範囲内とすることが好ましい。

【0117】次に、光ファイバの構成について説明する。図7は、本発明による第2の光ファイバの第1の実施形態について、その屈折率プロファイルを示す図である。

【0118】この光ファイバは、SiO₂ガラス（石英ガラス）系の光ファイバであり、光ファイバの中心軸を含むコア領域600と、コア領域600の外周に設けられたクラッド領域700とを有して構成されている。

【0119】コア領域600は、その外周の半径を r_0 として形成されている。このコア領域600には、純SiO₂ガラスに屈折率を上げる添加物としてCl（塩素）が所定量添加されている。これにより、コア領域600内の平均比屈折率差は、 Δn_0 （ただし、 $\Delta n_0 > 0$ ）となっている。

【0120】一方、クラッド領域700は、本実施形態においては、コア領域600の外周に設けられた内クラッド層701と、内クラッド層701の外周にさらに設けられた外クラッド層702との2層のクラッド層を有して構成されている。

【0121】内クラッド層701は、その外周の半径を r_1 として形成されている。この内クラッド層701には、純SiO₂ガラスに屈折率を下げる添加物としてF（フッ素）が所定量添加されている。これにより、内クラッド層701内の平均比屈折率差は、 Δn_1 （ただし、 $\Delta n_1 < 0$ ）となっている。

【0122】また、外クラッド層702は、その外周の半径を r_2 として形成されている。この外クラッド層702には、純SiO₂ガラスにF（フッ素）が所定量添加されている。これにより、外クラッド層702内の平均比屈折率差は、 Δn_2 （ただし、 $\Delta n_2 < 0$ ）となっている。ただし、外クラッド層702でのFの平均添加量は、内クラッド層701でのFの平均添加量よりも小さくされており、したがって、クラッド層701及び702の平均比屈折率差は、 $0 > \Delta n_2 > \Delta n_1$ の関係を有している。

【0123】また、平均比屈折率差 Δn_1 の内クラッド層701と、平均比屈折率差 Δn_2 の外クラッド層702とを合わせたクラッド領域700の全体としては、その平均比屈折率差 Δn_c は、上記した条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たす値（ただし、 $0 > \Delta n_2 > \Delta n_c > \Delta n_1$ ）となっている。

【0124】本光ファイバのコア領域600は、Cl添加SiO₂コアからなる。このコア領域600では、Clの添加によって粘性がやや小さくされているものの、その添加量などから、クラッド領域700に比べてコア領域600が大きい粘性を有する構成となっている。これに対して、クラッド領域700に添加されるFの添加量を、 $\Delta n_c = -0.26\%$ となる添加量の上限値以下の添加量（条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ に対応）とすることによって、光ファイバ内に加わる応力がクラッド領域700へと好適に分散されて、コアへの応力集中が抑制される。

【0125】このコアへの応力集中の抑制により、光ファイバの線引時に加えられる張力に対する伝送損失の張

力依存性が低減されて、伝送損失が全体として十分に低減される光ファイバが実現される。

【0126】また、本実施形態の光ファイバは、Fの添加量が多い（比屈折率差が小さい）内クラッド層701と、Fの添加量が小さい（比屈折率差が大きい）外クラッド層702との2層のクラッド層を有して、クラッド領域700が構成されている。

【0127】このような2層構造のクラッド領域700によれば、コア領域600の外周に位置する内クラッド層701によって、伝送される光をコア領域600及びその近傍へと効率的に閉じ込めることができる。また、外クラッド層702は、光ファイバの伝送特性を調整する効果、及びコアへの応力集中を低減する効果などを有する。そして、これらのクラッド層701、702を合わせたクラッド領域700全体での平均比屈折率差に対して上記した条件を適用することによって、コア領域600への応力集中を確実に抑制することができる。

【0128】ここで、クラッド層701、702での平均比屈折率差 Δn_1 、 Δn_2 については、その大小関係より、外クラッド層702での平均比屈折率差 Δn_2 は、条件

$$\Delta n_2 \geq -0.26\%$$

を満たしている。

【0129】また、コア領域600へのCl添加については、コア領域600への光の閉じ込めの効果などを十分に確保するため、その平均比屈折率差を $0.01\% \leq \Delta n_0 \leq 0.12\%$ の範囲内とすることが好ましい。なお、このCl添加については、伝送損失などへの影響が少ないために純SiO₂コアと同様に扱うことができ、また、コア領域600の粘性を小さくする効果もある。また、コア領域600内の屈折率分布については、コア領域600内で略一定の屈折率分布としても良いし、あるいは、グレーデッド型にしても良い。

【0130】図8は、本発明による第2の光ファイバの第2の実施形態について、その屈折率プロファイルを示す図である。

【0131】この光ファイバは、第1の実施形態と同様に、SiO₂ガラス（石英ガラス）系の光ファイバであり、光ファイバの中心軸を含むコア領域600と、コア領域600の外周に設けられたクラッド領域700とを有して構成されている。

【0132】これらのコア領域600及びクラッド領域700の構成は、図7に示した光ファイバとほぼ同様であるが、クラッド領域700の外クラッド層702の構成が異なるものとなっている。すなわち、本実施形態においては、外クラッド層702にはF（フッ素）が添加されず、純SiO₂ガラスからなる外クラッド層702となっている。したがって、クラッド層701及び702の平均比屈折率差は、 $0 = \Delta n_2 > \Delta n_1$ の関係を有している。

10

20

30

40

50

【0133】また、平均比屈折率差 Δn_1 の内クラッド層701と、平均比屈折率差 $\Delta n_2=0$ の外クラッド層702とを合わせたクラッド領域700の全体としては、その平均比屈折率差 Δn_0 は、上記した条件 $\Delta n_0 \geq -0.26\%$ を満たす値（ただし、 $0 = \Delta n_2 > \Delta n_0 > \Delta n_1$ ）となっている。

【0134】本実施形態の光ファイバにおいても、第1の実施形態と同様に、光ファイバ内に加わる応力がクラッド領域700へと好適に分散されて、コアへの応力集中が抑制される。これにより、光ファイバの線引時に加えられる張力に対する伝送損失の張力依存性が低減されて、伝送損失が全体として十分に低減される光ファイバが実現される。

【0135】ここで、本実施形態のように外クラッド層702を純 SiO_2 とした場合には、光ファイバを曲げたときの光漏れを防ぐなどの理由により、外クラッド層702の内周の半径（＝内クラッド層701の外周の半径） r_1 と、外クラッド層702の外周の半径 r_2 とが、条件

$$r_2 - r_1 \leq r_2 \times 0.3$$

を満たすことが好ましい。この条件は、外クラッド層702の厚みを光ファイバ全体の30%以下とすることに相当する。これによって、十分なコアへの応力集中の抑制効果を得るとともに、この外クラッド層の伝送特性への影響を好適な範囲内とすることができる。

【0136】図9は、本発明による第2の光ファイバの第3の実施形態について、その屈折率プロファイルを示す図である。

【0137】この光ファイバは、第1、第2の実施形態と同様に、 SiO_2 ガラス（石英ガラス）系の光ファイバであり、光ファイバの中心軸を含むコア領域600と、コア領域600の外周に設けられたクラッド領域700とを有して構成されている。このうち、コア領域600の構成については、図7及び図8に示した光ファイバにおけるコア領域600とほぼ同様である。

【0138】一方、クラッド領域700は、本実施形態においては、単一のクラッド層701を有して構成されている。クラッド層701は、その外周の半径を r_1 として形成されている。このクラッド層701には、純 SiO_2 ガラスに屈折率を下げる添加物としてF（フッ素）が所定量添加されている。これにより、クラッド層701内の平均比屈折率差は、 Δn_1 （ただし、 $\Delta n_1 < 0$ ）となっている。

【0139】また、このクラッド層701の平均比屈折率差 Δn_1 は、クラッド領域700の全体としての平均比屈折率差に相当し、その平均比屈折率差 $\Delta n_0 = \Delta n_1$ は、上記した条件 $\Delta n_0 \geq -0.26\%$ を満たす値となっている。

【0140】このように、第1、第2の実施形態に示した2層構造のクラッド領域を有する構成に限らず、本実

施形態のような1層構造のクラッド領域を有する構成などにおいても同様に、光ファイバ内に加わる応力がクラッド領域700へと好適に分散されて、コアへの応力集中が抑制される。これにより、光ファイバの線引時に加えられる張力に対する伝送損失の張力依存性が低減されて、伝送損失が全体として十分に低減される光ファイバが実現される。

【0141】本発明の第2の光ファイバ及びその製造方法による伝送損失の低減効果について、具体的な実施例及び比較例を示す。なお、以下の実施例及び比較例での光ファイバは、第2の比較例を除いて図1に示した加熱炉での徐冷を用いた製造方法によって作製した。ここで、徐冷用の加熱炉での加熱条件については、加熱炉中心の温度を 1350°C 、線速 $50\text{m}/\text{分}$ で、 1.5m 、通過時間 1.8 秒に設定した。また、線引時の張力は、すべて 0.10N （ 10gw ）とした。

【0142】第1の実施例となる光ファイバは、図7に示した屈折率プロファイルによって作製した。また、各半径 r_0 、 r_1 、 r_2 は、それぞれ $2r_0 = 10\mu\text{m}$ 、 $2r_1 = 55\mu\text{m}$ 、 $2r_2 = 125\mu\text{m}$ とした。

【0143】また、各領域での屈折率については、コア領域600には、平均比屈折率差が $\Delta n_0 = +0.08\%$ となるようにC1を添加した。一方、クラッド領域700の内クラッド層701には、平均比屈折率差が $\Delta n_1 = -0.28\%$ となるようにFを添加した。また、外クラッド層702には、平均比屈折率差が $\Delta n_2 = -0.20\%$ となるようにFを添加した。このとき、クラッド領域700全体としての平均比屈折率差は、 $\Delta n_0 = -0.215\%$ であった。

【0144】第2の実施例となる光ファイバは、図8に示した屈折率プロファイルによって作製した。また、各半径 r_0 、 r_1 、 r_2 は、それぞれ $2r_0 = 10\mu\text{m}$ 、 $2r_1 = 100\mu\text{m}$ 、 $2r_2 = 125\mu\text{m}$ とした。このとき、外クラッド層702の厚みは、 $r_2 - r_1 = r_2 \times 0.2 < r_2 \times 0.3$ となっている。

【0145】また、各領域での屈折率については、コア領域600には、平均比屈折率差が $\Delta n_0 = +0.08\%$ となるようにC1を添加した。一方、クラッド領域700の内クラッド層701には、平均比屈折率差が $\Delta n_1 = -0.28\%$ となるようにFを添加した。また、外クラッド層702にはFを添加せずに純 SiO_2 とし、平均比屈折率差が $\Delta n_2 = 0.00\%$ とした。このとき、クラッド領域700全体としての平均比屈折率差は、 $\Delta n_0 = -0.178\%$ であった。

【0146】第3の実施例となる光ファイバは、図9に示した屈折率プロファイルによって作製した。また、各半径 r_0 、 r_1 は、それぞれ $2r_0 = 10\mu\text{m}$ 、 $2r_1 = 125\mu\text{m}$ とした。

【0147】また、各領域での屈折率については、コア領域600には、平均比屈折率差が $\Delta n_0 = +0.08$

%となるようにC1を添加した。一方、クラッド領域700のクラッド層701には、平均比屈折率差 $\Delta n_c = \Delta n_1 = -0.26\%$ となるようにFを添加した。

【0148】さらに、光ファイバの第4の実施例として、第1の実施例と同様の構成の光ファイバについて、徐冷用の加熱炉での加熱条件を、1100℃で通過時間1.8秒に設定して光ファイバを作製した。

【0149】以上の第1～第4の実施例に対して、上記した構成を満たさない光ファイバを第1、第2の比較例として作製した。

【0150】第1の比較例となる光ファイバは、図9に示した屈折率プロファイルによって、第3の実施例とほぼ同様の構成で作製した。ただし、クラッド領域700のクラッド層701について、平均比屈折率差 $\Delta n_c = \Delta n_1 = -0.35\%$ ($< -0.26\%$)となるようにFを添加した。

【0151】第2の比較例となる光ファイバは、上記した第1の比較例と同様の構成で作製した。ただし、その線引工程において、加熱炉での徐冷を行わずに光ファイバを線引した。

【0152】以上の第1～第4の実施例、及び第1、第2の比較例について、クラッド領域700の平均比屈折率差 Δn_c 、レイリー散乱係数A、構造不整損失B（上述した伝送損失 $\alpha\lambda$ の式を参照）、波長1.00 μm での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、及び波長1.55 μm での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ を求めた結果を表2に示す。ここで、伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 及び $\alpha_{1.55}$ は、それぞれ、

$$\alpha_{1.00} = A + B$$

$$\alpha_{1.55} = 0.17325 \times A + B + 0.016$$

である。

【表2】

	Δn_c	A	B	$\alpha_{1.00}$	$\alpha_{1.55}$
実施例1	-0.215	0.790	0.008	0.798	0.159
実施例2	-0.178	0.800	0.008	0.808	0.161
実施例3	-0.260	0.780	0.011	0.791	0.162
実施例4	-0.215	0.810	0.010	0.820	0.164
比較例1	-0.350	0.800	0.015	0.815	0.169
比較例2	-0.350	0.850	0.008	0.858	0.170

(単位: $\alpha_{1.00}, \alpha_{1.55}, B = \text{dB/km}$; $A = \text{dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$)

【0153】まず、各光ファイバでの平均比屈折率差 Δn_c については、第1～第4の実施例が条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たしているのに対して、第1、第2の比較例では上限値を超えるFの添加によって、 $\Delta n_c < -0.26\%$ となっている。

【0154】次に、レイリー散乱係数A、構造不整損失B、及び伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、 $\alpha_{1.55}$ について見ると、通常の構造で徐冷を行わずに作製した第2の比較例では、レイリー散乱係数Aの値は、上述した基準値の0.85

dB/km $\cdot \mu\text{m}^4$ となっている。また、構造不整損失Bの値は、0.008 dB/kmで、全体として伝送損失 $\alpha_{1.00}$ は、ほぼ上述した基準値の0.858 dB/kmである。また、伝送損失 $\alpha_{1.55}$ は、0.170 dB/kmである。

【0155】また、通常の構造で徐冷を行って作製した第1の比較例では、レイリー散乱係数Aの値は、0.800 dB/km $\cdot \mu\text{m}^4$ まで低減されているものの、構造不整損失Bは、0.015 dB/kmと徐冷によって逆に増大しており、全体として伝送損失 $\alpha_{1.55}$ は、0.169 dB/kmと、充分には低減されていない。

【0156】これに対して、第1～第4の実施例では、いずれもレイリー散乱係数A及び構造不整損失Bともに低減されており、全体として伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、 $\alpha_{1.55}$ の十分な低減が実現されている。

【0157】すなわち、2層構造のクラッド領域を有する第1の実施例では、レイリー散乱係数Aが0.790 dB/km $\cdot \mu\text{m}^4$ まで低減されると同時に、構造不整損失Bについてもその増大が防止されて0.008 dB/kmとなっている。そして、全体の伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、 $\alpha_{1.55}$ としては、それぞれ0.798 dB/km、0.159 dB/kmと、十分な低減が実現されている。

【0158】また、2層構造で外クラッド層が純SiO₂の第2の実施例、及び1層構造の第3の実施例についても、第1の実施例と同様に、全体として十分に伝送損失が低減されている。また、加熱条件を変えた第4の実施例についても、第1の実施例と同様に、全体として十分に伝送損失が低減されている。

【0159】以上より、徐冷を用いた製造方法などのレイリー散乱損失の低減効果を有する製造方法を用いるとともに、光ファイバまたは光ファイバ母材のコア領域及びクラッド領域の構成について、コア領域を、純SiO₂コアまたはそれに準じるC1添加SiO₂コアとし、クラッド領域を、条件 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たすようにFが添加された構成とすることによって、レイリー散乱損失を確実に低減すると同時に、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分の発生及び増大を防止して、全体として伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバ、及びその製造方法が実現される。

【0160】なお、2層構造を有する第1の実施例では、外クラッド層702の平均比屈折率差 $\Delta n_2 = -0.20\%$ となっている。この平均比屈折率差については、さらに大きい値とすることも可能である。ただし、この実施例では、外クラッド層702の内周の半径が $2r_1 = 55 \mu\text{m}$ と比較的小さいので、 $\Delta n_2 = -0.1\%$ 程度が限度と考えられ、それより大きい値とする場合には、第2の実施例のように、外クラッド層の厚みをより小さくすることが好ましい。

【0161】また、第1の実施例について、波長1.55 μm での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ の張力依存性を調べたところ、張力0.04 Nで0.175 dB/km、0.05

10

20

30

50

Nで0.170dB/km、0.08Nで0.163dB/km、0.10Nで0.159dB/km、0.16Nで0.164dB/km、0.20Nで0.170dB/km、0.25Nで0.175dB/kmであった。この結果より、線引時の張力についての好適な張力値範囲は、0.05~0.20Nの範囲と考えられる。

【0162】本発明による光ファイバ及びその製造方法は、上記した実施形態及び実施例に限られるものではなく、様々な変形や構成の変更が可能である。例えば、光ファイバの製造方法については、図1に示した構成の線引装置による製造方法に限らず、徐冷用の加熱炉を備えるものであれば、他の構成からなる線引装置を用いても良い。また、徐冷以外の方法でレイリー散乱損失を低減する製造方法を用いても良い。

【0163】また、光ファイバまたは光ファイバ母材の構成についても、様々な変形が可能である。まず、第1の光ファイバについては、図3及び図4に示した実施例以外にも、粘性比の条件 $R\eta \leq 2.5$ を満たすものであれば、様々な構造の光ファイバを用いて良い。例えば、分散補償ファイバや分散シフトファイバは、いずれも通常は粘性比 $R\eta$ が小さく2.5以下であり、したがって、上記した実施例と同様に、伝送損失の低減効果を得ることができる。

【0164】また、第2の光ファイバについては、例えば、クラッド領域の構成については、図7~図9に示した実施形態以外にも、上記した構成の条件を満たすものであれば、様々な構造の光ファイバを用いて良い。また、コア領域については、図7~図9ではClが添加された構成とされていたが、純SiO₂からなるコアとしても良い。

【0165】

【発明の効果】本発明による光ファイバ及びその製造方法は、以上詳細に説明したように、次のような効果を得る。すなわち、レイリー散乱損失を低減可能な光ファイバの構成または製造方法を用いるとともに、コア平均粘性 η_0 と全体平均粘性 η_t との粘性比 $R\eta = \eta_0 / \eta_t$ を2.5以下とする光ファイバ及びその製造方法によれば、レイリー散乱損失を確実に5%以上低減して基準値の95%以下とすることができるとともに、構造不整損失などの他の伝送損失成分の発生及び増大が、同時に抑制される。したがって、全体としての伝送損失が十分に低減された光ファイバが得られる。

【0166】また、レイリー散乱損失を低減可能な光ファイバの構成または製造方法を用いるとともに、コア領

域を純SiO₂またはCl添加SiO₂とし、クラッド領域を、 $\Delta n_c \geq -0.26\%$ を満たす範囲の添加量でF（フッ素）を添加して構成した光ファイバ及びその製造方法によれば、レイリー散乱損失を確実に低減すると同時に、構造不整損失などのレイリー散乱損失以外の伝送損失成分の発生及び増大を防止して、全体として伝送損失を確実に低減することが可能な光ファイバ、及びその製造方法が実現される。

【0167】上述した構成及び製造方法によって得られる光ファイバは、非常に低伝送損失であり、したがって、長距離の光伝送システムに適用したときに、光増幅器などが設置された中継器の数を減らすことができるなど、効率的な光伝送システムを構築することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】光ファイバの製造方法、及び光ファイバの製造に用いられる線引装置の一実施形態を概略的に示す構成図である。

【図2】第1の光ファイバにおける粘性比 $R\eta$ について説明するための図である。

【図3】第1の光ファイバの第1の実施例での屈折率プロファイルを示す図である。

【図4】第1の光ファイバの第2の実施例での屈折率プロファイルを示す図である。

【図5】光ファイバの比較例での屈折率プロファイルを示す図である。

【図6】光ファイバにおける張力及び残留応力の相関を示すグラフである。

【図7】第2の光ファイバの第1の実施形態での屈折率プロファイルを示す図である。

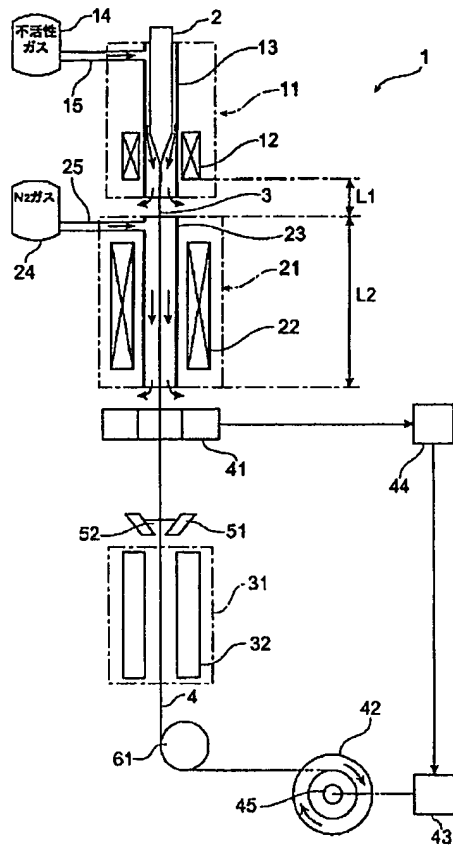
【図8】第2の光ファイバの第2の実施形態での屈折率プロファイルを示す図である。

【図9】第2の光ファイバの第3の実施形態での屈折率プロファイルを示す図である。

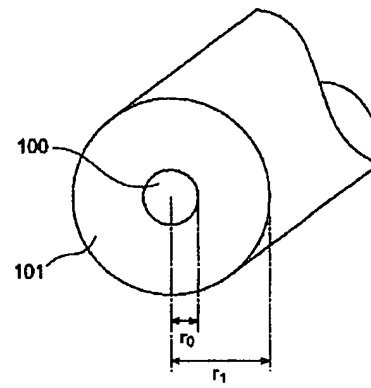
【符号の説明】

1…線引装置、11…線引炉、12…ヒータ、13…炉心管、14…不活性ガス供給部、15…不活性ガス供給通路、21…加熱炉、22…ヒータ、23…炉心管、24…N₂ガス供給部、25…N₂ガス供給通路、31…樹脂硬化部、32…UVランプ、41…外径測定器、42…ドラム、43…駆動モータ、44…制御ユニット、45…回転駆動軸、51…コーティングダイス、52…UV樹脂、61…ガイドローラ、2…光ファイバ母材、3…光ファイバ、4…光ファイバ素線。

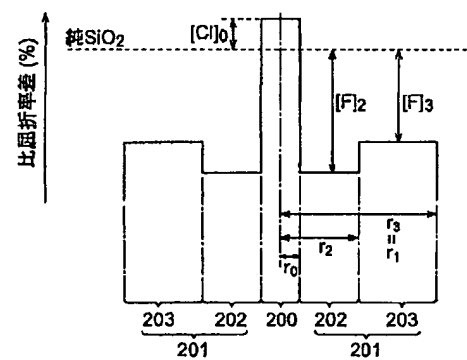
【図1】



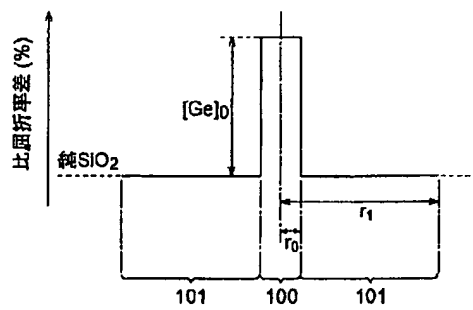
【図2】



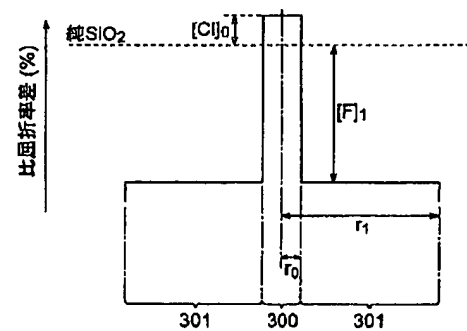
【図4】



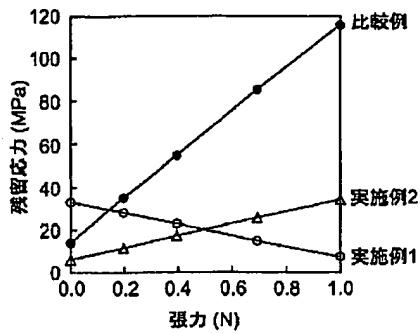
【図3】



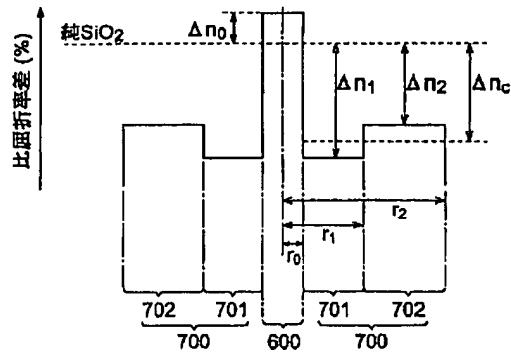
【図5】



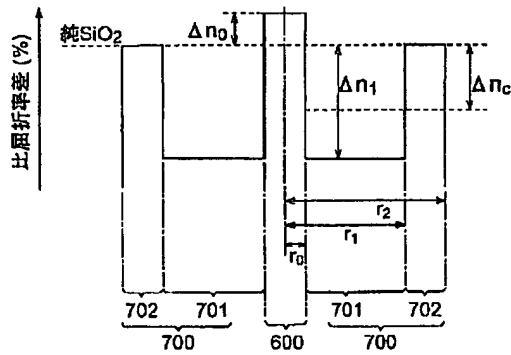
【図6】



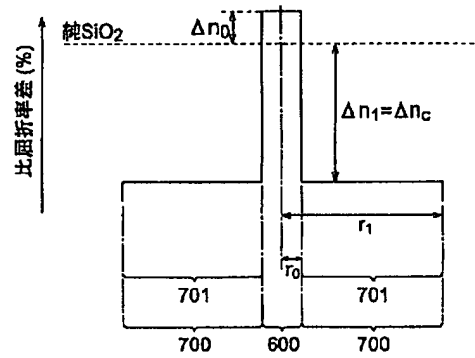
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72) 発明者 土屋 一郎
神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
(72) 発明者 大賀 裕一
神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内

(72) 発明者 石川 真二
神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
(72) 発明者 内山 武典
神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
Fターム(参考) 2H050 AB04X AB04Y AB10Y AB18X
AC03 AC38 AC71 AC73 AD03
4G021 HA02 HA05